



TITLE:

量子力学に熱力学由来の制約を課
すこと (量子情報とその周辺分野の
解析的研究)

AUTHOR(S):

松野, 孝一郎

CITATION:

松野, 孝一郎. 量子力学に熱力学由来の制約を課すこと (量子情報とその周辺分野の解析的研究). 数理解析研究所講究録 2001, 1196: 52-62

ISSUE DATE:

2001-04

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/64857>

RIGHT:

量子力学に熱力学由来の制約を課すこと

長岡技術科学大学生物系 松野 孝一郎 (Koichiro Matsuno)

1 はじめに

量子統計力学に従えば熱力学は量子力学から導かれることになりますが、ここではその逆を考えてみることにします。ただ単に奇をてらうのが目的であるわけではありません。量子力学から熱力学を導こうとしますと、その境界条件を予め用意する必要がありますが、境界条件はそこでの量子力学とは独立した仕方で準備されるのが常です。境界条件は対象とする量子系が従うべき条件をその外から強制するという強度を及ぼします。境界条件が課され、かつそれが更改されて行くという実際状況を想定してみますと、そこで起きていることは強度の実現とその変化運動です¹⁾。それに具体的に対処するため、先ず極めて簡単な事例を取り上げてみることにします。

ここに1.5ボルトの乾電池を用意し、それに豆電球を接続してみることにします。接続が間違いなくなされれば豆電球は点灯しますが、ここで誤って豆電球を接続しそこね、プラス、マイナス極を抵抗値の極めて小さい導線で短絡したとします。このとき、電池は起電力を急速に失いますが、その起電力の消失は可能な限りの最短時間で進行します。その理由は単純明解です。もし、よりゆっくり起電力を失うとするならば、その結果、電池から流れ出す電流はオームの法則により起電力の大きい分だけ大きくなり、その分だけ起電力をより速く失います。しかし、起電力をより速く失うとするこの結論は、よりゆっくりと起電力を失うとする前提に明らかに矛盾します。矛盾の原因は、電池がよりゆっくりと起電力を失うとせよ、とした前提にあります。結線された電池にとってその強度を表わす起電力は可能な限りの最短時間で失われて行きます。この強度緩和速度の最大化という選択則は何も乾電池に限られはしません。他の物理過程にも当然あてはまります。そこでもう一つ、別の例を挙げてみます。

雷雲が発生したとき、落雷は可能な限りの最短時間で実現します。落雷はそのチャンスがあったにも拘わらず、次のチャンスを待つ、ということを決してしません。雷雲を特徴づけるのは地表との電位差という強度であり、この強度緩和はその緩和速度の最大化という内生の選択則を伴います。地表は雷雲を成り立たせる荷電体、電子への消費者として作用し、この消費者は雷雲が提供する落雷のチャンスのうち、最も速くに提供したもののみを実現させます。この強度緩和速度最大化をもたらす消費者支配の熱力学は、そこでの消費者が働きかける相手としての熱力学系に構造化をもたらします。無秩序化ではなく、その逆です。これは、強度が分割、加算を許す外延量ではなく、全体に関わる内包量であることにより、乾電池、雷雲のいずれにとっての電位差も強度として全体との関わりにおいてのみ定まっています。

もちろん、物理において出会う強度は電位差だけに限られることはありません。最も代表的な強度は温度であり、その強度実現は熱力学に密接に関連しています。温度と呼ばれる強度による作用が最も明瞭に現われているのはエネルギー変換においてです。

2 熱力学第一法則とエネルギー変換

熱力学において物質変換、あるいはエネルギー変換を直接に参照しているのはその第一法則です。オランダ商船の船医であったユリウス・ロベルト・フォンマイヤーはジャカルタに渡り、そこで診察した患者の静脈血の赤色がそれより高緯度に住む患者の赤色に較べてより鮮明であることに気づき、帰国後、その観察結果を後に熱力学第一法則と称せられる内容にまとめ、フォンリービッヒが編集長を務めていた化学と薬学の専門誌に発表しました。1842年のことです。その翌年、ジェームス・プレスコット・ジュールは熱の仕事当量を確定し、マイヤーの法則とほぼ同一内容の結果を公表しました。マイヤー、ジュールに共通しているのは、エネルギーがその質の変換を受けても、その量は不変に保たれる、としている点です。

熱力学第一法則が前提としているのは、エネルギー変換を行う作用体です。これがどのような作用体であるかは、マイヤー、ジュールにおいてそれぞれ自明であった筈です。マイヤーは生物体としてのわれわれの体そのものを熱を発生させる作用体であると見なし、ジュールは水中で回転することの出来る羽根車という仕組みが回転運動エネルギーを水の熱エネルギーに変換させる作用体であると見なしました。しかし、熱力学第一法則としてまとめ上げられてしまうと、その内容はエネルギー変換を行う個々の作用体の個別性、具体性にかかわらないものになってしまいます。どのような作用体であれ、それがエネルギー変換を行うとき、変換の前後でエネルギーの量は不変に保たれることが第一法則によって規定されます。

一方、理論としての熱力学は熱平衡から出発します。対象としている熱力学系が周りにある巨大な熱浴に常時、接しており、十分に時間が経てばその熱浴との間に熱平衡が達せられる、との前提が平衡系熱力学には要請されます。熱浴は確かに一つの作用体であり、対象としている系との熱平衡を実現させるために不可欠な作用体です。しかし、この熱平衡をもたらすだけの熱浴から、第一法則が想定するエネルギー変換作用体は生まれません。熱力学第一法則には熱平衡をもたらすだけの熱浴という作用体以外の作用体も当然のことながら含まれています。ここにおいて、現象のみから導かれて来た熱力学と統計力学を介して導かれて来た熱力学との差異が明瞭になります。統計力学に裏打ちされた熱力学においては、対象としている系がそれと熱平衡をもたらすことになる熱浴を保証することまではしますが、それ以上ではありません。熱平衡を可能とする熱浴以外の作用体をもたらすためには、新たな境界条件を想定しなければなりません。そうでありながら、統計力学はそれ自身を可能とする境界条件をもたらす作用体以上の作用体を容認することをしません。ところが現象のみから導かれて来た熱力

学では、熱平衡を可能とするだけの作用体以上の作用体を絶えず想定しています^{2,3)}。それは熱力学系が周りの熱浴との間に示す熱揺らぎにも見ることが出来ます。

熱揺らぎには熱浴から系に供給される熱エネルギーが過剰になるエネルギー過剰揺らぎと、それが過少になるエネルギー過少揺らぎの二通りがあり得ます。エネルギー過剰揺らぎでは熱浴は熱エネルギー供給者として作用し、エネルギー過少揺らぎでは熱浴は熱エネルギー消費者として作用することになります。熱浴には元来、エネルギー供給、消費という二つの作用が潜在しており、熱平衡の実現という極限状態が想定されるときに限って、この二つの作用の間に平衡が維持されます。そのため、この極限操作をとる以前の通常の状態では熱浴からの作用として熱エネルギーの供給か、消費のうちのいずれか一方が優勢になり、この優勢になる作用が絶えず交代させられることになります。この交代が系の示す熱揺らぎとして外部から観測されます。熱揺らぎを想定した上での熱浴は熱エネルギー供給者、消費者の二つの作用体から成り立っており、この二つの作用体が平衡するのはあくまでもその長時間平均を考慮したときのみに限られます。この長時間平均をとらない限り、熱エネルギー供給、消費というそれぞれ独立した作用が熱浴から及ぼされることになります。

この熱浴にかかわる熱エネルギー供給者、消費者の役割をより鮮明に表わした一つの典型例は高温熱源（熱エネルギー供給者）と低温熱源（熱エネルギー消費者）との間におかれた熱機関です。ここでは確かに熱力学第一法則の想定するエネルギー変換が可能になります。これが熱機関です。1824年に公表した「火の動力およびこの動力を発生させることに適した機関の考察」において、フランス陸軍の工兵士官サジ・カルノーは準静的過程（可逆過程）と断熱過程（エントロピー、一定）を組み合わせることにより、この熱機関のもたらす最大効率を導くことに成功しました。この根底には、熱力学が二つ、あるいはそれ以上の異なる作用体を容認する、との前提があります。

しかも、二つあるいはそれ以上の作用体が同時に作動しだすとき、カルノー・サイクルのようにすべてが準静的過程あるいは断熱過程に従うとするのは、まさに例外です。生命の起源以後に現れて来た生物由来であって、量子力学に従うハードウェア部品からなる熱機関を見てみれば、このことは明かです。

膜で覆われた原核生物がこの地球上に初めて出現したとき、その原核細胞内では既に物質の能動輸送が可能となっています。その能動輸送を可能とするエネルギーとそれへのエネルギー変換を司る代表例はミオシン分子によるATPの加水分解です。ATP分子が加水分解を受けてADPと無機リン酸に分解されるとき、凡そ 5×10^{-13} エルグの化学結合エネルギーを解放しますが、それを解放するのに要する時間は著しく大きくなります。ミオシンがさらにアクチンと結合することによって、そのATP加水分解が加速されたとしても、少なくとも10ミリ秒以上の時間を要します。 5×10^{-13} エルグのエネルギーが10ミリ秒を費やして連続的にエネルギーが解放されて行くものとしますと、それは当然のことながら物質過程としての量子過程に従っているため、放出エネルギーを担う個々の量子のエネルギーも著しく小さくなります。放出される量子のエネルギー e_m が判明すれば、不確定性原理より、その放出に要する最小時間 Δt_m ($\approx \hbar / e_m$; \hbar

はプランク定数を 2π で割ったもの) も判明します。10ミリ秒で合計 5×10^{-13} エルグのエネルギーを放出するとするならば、個々の放出量子の平均エネルギー e_m は凡そ 2×10^{-19} エルグになります。この放出量子が黒体輻射によって放出されたものとする、その黒体の温度は凡そ1.6ミリ度Kとなります。これは局所的ではありますが、極低温部が出現したのと等価になります⁴⁾。

細胞でATP分解酵素(例; ミオシン)によるATP加水分解は局所的にはありますが、実効的に極低温を実現することと等価になります。生物細胞は通常、常温にある外界、環境に接していますが、その内部に局所的ながら、極低温を実現している熱機関と見なすことが出来るようになります。熱機関としての生物細胞は高温源、すなわち常温にある外界と、実効的に極低温にある極低温源の間で作動していることになります。高温源は生物細胞に対して熱エネルギー供給という作用を及ぼしますが、生物細胞そのものは実効的に実現された極低温源と一体となって、その外へ向かって熱エネルギーの消費という作用を及ぼします。熱機関は二つ、あるいはそれ以上の異なる作用体の介入を前提とすることに鑑みますと、地球上に出現することになった原核細胞は確かにこの条件を満足しています。生物細胞が作用体として能動的であるのはそれが熱エネルギー消費者として外へ向かって働きかけることが出来る点に認められます。これは熱機関にとって当然なことです。この熱機関の実現はエネルギー変換を司る熱力学第一法則の枠内で生じることの出来る極めて当たり前の現象です。根底にあるのはもちろん量子力学です。

原核細胞は最も原始的なものであっても、熱エネルギーの獲得のためにその外界へ向かって働きかけることの出来る熱エネルギー消費者となります。熱力学第一法則はこの熱エネルギー消費者の出現を当然な物質現象である、と見なすことのできる視点を与えてくれます。しかし熱力学と量子力学との接点を求めて生命の起源にまで立ち戻ると、物質由来の熱エネルギー消費者の出現、介入はさほど自明なことではありません。このあるべき自明さに対して、熱力学に関し、これまでに獲得してきたわれわれの理解が立ちはだかります。平衡系の熱力学を確立するために、熱エネルギー供給、消費が相互に平衡し、その平衡を実現する作用体として一つの熱浴のみを認めるならば、それから別の新たな作用体を導き出すことは拒否されてしまいます。一つの熱浴から、もう一つの、しかも独立した作用体としての熱エネルギー消費者の出現は原理的に拒否されてしまいます。だが、この一つの熱浴という制約を解除してしまえば、事態は一変します。

熱エネルギー供給と消費との平衡、均衡はあくまでも理論において要請されてきた人工的制約にしか過ぎません。確かにこの制約が極めて有効に機能してきたのは熱力学のこれまでの発展において否定することの出来ない事実ではありますが、それによって、この平衡が熱力学現象においていつも常に保証される、ということにはなりません。この一つの熱浴という制約を外すならば、熱エネルギー消費者の介入は熱力学現象においてむしろ当然になってきます。熱力学第一法則は対象が生物である、なしに拘わらず、熱エネルギー消費者の介入を積極的に標榜します。生命の起源という現象にとって火急となる、より具体的な課題とは、生物活動という作用のない前段階からその作用がいかに出現してきたのか、では

なく、熱力学第一法則が既に想定している熱エネルギー消費者という作用者を生命の起源と称される現象、あるいは量子力学過程そのものがいかに利用してきたか、に集約されます。

3 エネルギー分布緩和と温度緩和

熱力学第一法則がエネルギー変換をもたらすとき、必ず二つ以上の独立した作用体が想定されます。その典型例が高温熱源と低温熱源です。ここで、高温熱源は熱エネルギーの供給者、低温熱源は熱エネルギーの消費者として作用します。このエネルギー変換の根底にあるのは、一方から供給された熱エネルギーが他方に向かって緩和し、消費されて行く、とする過程です。

緩和過程は、少なくとも、二つの相異なるクラスに類別されます。その一つは、緩和して行くものが常に加算的であるとする場合です。非均質的、非等方的なエネルギー分布が与えられたとき、その分布の緩和の仕方は例外なく加算的となります。エネルギー分布は、それがどのような部分分布から成り立っていようと、その部分分布への分割の仕方に依存することなく、一意に確定されます。エネルギー分布という外延量は分割され、その後に再び加算されても、一切の変更、変化を受けることはありません。すなわち、エネルギー分布の緩和はその無限分割を許容するという制約下のみで進行します。

緩和に可能なもう一つのクラスは、緩和して行くものの加算性が保証されていない場合です。その典型例は温度と呼ばれる強度に見ることができます。温度はランダムに運動するものの「ランダムさ強度」を表します。しかし、温度そのものはランダムな運動を担うものが何であるかを予め明らかにすることをしません。この不定さは、温度そのものが物理的に不備なものである、と指弾しているのでは決してありません。温度を与える具体的な物性が何であるかは、ランダムに運動するものが確定された後に初めて明らかにされますが、温度自体はランダムに運動するものが何であるかをそれだけで決定することをしません。ランダムに運動するもののエネルギー分布については、その加算性、分割性が常に成り立ちますが、温度そのものを決める機構、すなわちランダムに運動するものが何であるかを決める機構についてまでの加算性、分割性は本来、不明のままです。温度を定めるランダムな運動体集合が何であるかを知るためには、温度がまさに変化しつつある現場を直接に参照するより他に方法はありません。温度は、何がランダムな運動体であるのか、を定める文脈の内包が確定された後に初めて定まる量、内包量です。

例えば、われわれの体の中の血液中にあるヘモグロビン分子に捕捉された鉄原子は、かつて宇宙のどこかで生じた超新星爆発からの残骸であって、1億度以上の超高温下で生じたものですが、体の中は大略310度Kの温度にあります。鉄原子が生成されるときは超高温とそのまま鉄原子がヘモグロビン分子に捕捉されているときの温度では、温度を定める文脈の内包が大きく異なります。超新星爆発によって鉄原子が生成されるとき、それを構成する核子のランダムな熱運動のエネルギーは核子間の結合エネルギーに変換されます。鉄原子はそれを構成する核子のかつての熱運動エネルギーを核子間の結合エネルギーに変換して、その原

子内に貯えることをします。熱運動エネルギーが結合エネルギーに変換されると、核子が示す運動のランダムさは著しく低減させられます。しかも、一度鉄原子が生成されるならば、かつての核子のランダムな熱運動は鉄原子そのものが示すランダムな熱運動とは明瞭に区別されます。

温度を定めるランダムな運動体を確定する仕組みがどのようなものであるのかを見るためには、今まさに温度が変化しつつある状況を想定してみるのがその一つの方法です。温度の変化は、通常その値が増加するか、あるいは減少するか、で示されます。ある物体の温度変化がその値の増加の渦中にあるときには、当の物体がそれより高温にある熱源、あるいは熱浴に接している場合に相当します。このとき、その物体の温度上昇は可能な限り大きな速度でもって実現されます。それより小さな速度でもって温度上昇を引き起こす可能性は自ずと排除されてしまいます。その理由は次に見る通りです。温度を定めるのは当の物体の内包であって、その内包自体は加算、分割を許しません。内包に関して複数の可能性が想定されても、それらは相互に背反する関係にあります。その内のどれか一つが実現されてしまえば、他の可能性は全て排除されてしまったことになります。しかも温度変化は速度現象であるため、最も早く変化を実現するものがそこでの変化過程を支配します。温度上昇が既に完了しているならば、更に温度上昇をもたらす余地はありません。同じことが温度降下にも当てはまります。ある物体がそれより低温にある熱源、あるいは熱浴に接したとき、その温度降下は可能な限りの大きな速度でもって実現されます。この温度変化速度最大化という選択則は、温度を指定する相異なる内包、あるいは文脈は相互に背反する、という極めて単純な事実由来するものです。

熱浴に比べてはるかに小さい物体がその熱浴からの影響を受けて温度変化を被るとき、その物体が実現することになる最も確からしい内包は、可能な限り大きな温度変化速度を実現させる内包、となります。この内包に変化が生じる余地が最早ないときに限って、そこで生じる温度変化、緩和は外延量のみに関わるエネルギー分布緩和によって実現されることになります。緩和過程が外延量の緩和によって支配される典型例はエントロピー最大化で指示されるものです。確かに、エントロピーは加算、分割を許す外延量、エネルギー分布に関連づけられた定量指標です。外延量に関わる緩和では、エントロピー最大化が示すように、ランダムさの均質化、等方化が避けられなく、それから生命の起源に対応するような物質の非均質的、非等方的な集積化、組織化は期待できません。それに引き換え、内包に変化をもたらす得る温度変化過程にあっても、たとえそれが緩和過程の渦中にあっても、内包の変化を通して、物質の非均質的、非等方的な集積化、組織化が期待されます。低温熱源、あるいは熱エネルギーの消費者が出現するならば、物質の内包に変化をもたらす緩和過程が可能になります。生命の起源に関わってくるのは、この内包の変化を可能とする緩和過程の方です。

4 温度緩和を受ける量子力学過程としての化学進化

4. 1 熱エネルギー消費者としての星間宇宙

やがて生物進化に連なる、その前段階としての化学進化においては小さな有機分子が生成されることにはなりますが、その生成は何も原始地球上に限られてはいません⁵⁾。小さな有機分子の生成は広く星間宇宙で進行していることが遠赤外の分子スペクトルの観測から判明して来ました。星間宇宙には主として水の氷から成る小さな塵で充満しており、その温度は通常、20～100 Kの範囲にあります。その塵が星間宇宙を漂っている間にたまたま恒星からの紫外光を受けると、その間だけ当の塵の温度は200 Kほどにも上昇します。だが、恒星からの紫外光照射が介在する塵の雲によって遮られてしまうと、一時的に暖められた塵は再び星間宇宙という極低温の熱浴に接することになります。星間宇宙は巨大な低温熱源、あるいは熱エネルギー消費者として作用します。ここにおいて、塵に付着していた二酸化炭素などの分子が紫外光による励起を受けた後に、直ちに温度緩和を受けることになります。そこで生起する温度緩和の内、最も確からしいのはその温度降下速度を可能な限り大きくするもの、となります。励起された分子から小さな有機分子が生成されたとき、それを維持したまま温度降下する方がより速くその降下を実現するならば、この温度緩和を通して、生成された有機分子はそのままに保存されることになります。実際、宇宙塵から脂肪族化合物に固有な $-CH_2-$ 基、あるいは $-CH_3$ 基に由来する吸収スペクトル（波長3.4 μm 、あるいは波数2955 cm^{-1} ）が確認されています⁶⁻⁹⁾。

化学進化を駆動するエネルギーの供給者の候補は、当然のことながら、恒星よりの紫外光に限られてはいません。宇宙線、崩壊する原子よりの放射線、雷放電、火山よりの放熱も化学進化を駆動します。特に原始地球上で進行してきた化学進化では、太陽光、雷放電、地熱が主たるエネルギー源となりますが、エネルギー供給者だけでは不十分です。エネルギー消費者も併せて出現していなければ、それからの化学進化は覚束なくなります。その観点から眺めるならば、原始地球を中心舞台としたとき、恒常的なエネルギー消費者が出現する仕方には少なくとも二通りあり得ました。一つは太陽光をエネルギー供給者とみなし、大気圏外宇宙をエネルギー消費者とするものです。もう一つは、海底下より噴出し、地熱により熱せられた熱水をエネルギー供給者とみなし、熱水口の周りの冷水海洋をエネルギー消費者とみなすものです^{10,11)}。この二つのうち、太陽光からのエネルギーを受けたものに対して大気圏外宇宙がエネルギー消費者として作用する方は、予め太陽光からの光子エネルギーを反応分子内に一定期間とどめおく物質構造を前提としなければなりません。しかし、もう一方の海底熱水口の周りの冷海水がエネルギー消費者として作用する方は、地球歴史に固有なことであって、地球上に海洋が出現した約42億年前から現在に至るまで変わらずにそこにあります。エネルギー消費者が化学進化に寄与するとするならば、少なくとも海底熱水口の近くでは、太陽光の場合に比べて、そのための多くの条件が既に満たされていることになります。それを確認するための最も手早い方法はやはり実験に訴えるものです。

4. 2 海底熱水エネルギーから分子結合エネルギーへ

海底熱水噴出口からの微小熱水塊が周りの冷海水中に放出されると、その冷海水は熱水塊に対してエネルギー消費者として作用します。その結果、微小熱水塊

は温度降下速度最大化を被ります。もしこの熱水塊中に反応分子が含まれているとするならば、そこで実現される分子形態には温度降下速度を最大とするものに限るとの自律選択がそこで働きます。微小熱水塊中の分子の結合解離が断熱的に進行する限り、熱水塊の温度が降下中であっても断熱的に多様な分子形態が現われ得ます¹²⁾。その中でやがて定着されるのが温度降下速度を最大とするものとなります。星間宇宙での化学進化では宇宙塵の上でアミノ酸までの生成は確認されていますが、そのアミノ酸が更に重合してオリゴペプチドが生成されるか否かは、原始地球上で進行する化学進化についての試金石になるものです¹³⁾。地球上の生物を担う生命の出現にとっては、先ずもってオリゴペプチドの生成が必須です。アミノ酸を含む微小熱水塊がその分子間での断熱反応を介してペプチド結合を形成し、それが周りの冷海水からの温度降下速度最大化という自律選択を被ることによりそのペプチド結合が果たして定着されてくるか、という検証すべき課題がここに浮上してきます。

4. 3 フローリアクター

アミノ酸などの単量体のオリゴマー化が消費者支配の熱力学において実際に可能になるか否かを見てみるために、海底熱水口を模倣したフローリアクターを実験室内に作ってみました¹⁴⁾。海底2000m以下では200気圧以上の圧力にもなり、そこでは水は350°Cであっても液体のままにとどまることが出来ます。そこで高温高压部の到達温度の上限値を350°Cに設定し、圧力を24MPaに選びました。反応分子を含んだそこからの高温高压水を径の細いノズルを通して低温高压部に噴出させます。低温部の温度は0°Cに設定しました。更に、反応分子を含む水溶液は加圧ポンプを介して繰り返して高温高压部に送り込み、フローリアクター内を循環させることをここで行いました。この条件下で反応分子として最も簡単なアミノ酸であるグリシンを選んだときの重合生成物の確認を次に行いました。高温高压部の温度を250°Cに設定し、反応分子のフローリアクター内の一巡時間を攪拌混合条件下で34秒に選んだとき、リアクター運転開始後10分足らずでグリシンが相互にペプチド結合を形成した3量体の生成を確認することができました。この反応液は純水にグリシンを溶かしただけです¹⁵⁾。

一方、実際の海底熱水口では地下マグマからの金属がイオンとして多量に溶け込んでいます¹⁶⁾。これは各種化学反応への触媒になると同時に、特に2価の金属イオンの場合には生成された重合物の水中での加水分解を抑制することを行います。そこで前と同じ反応溶液に2価の銅イオンを加え、前と同じ実験条件で重合生成物の確認を行いました。運転開始後約20分でグリシンの6量体を得ることが出来ました¹⁷⁾。

リアクターの運転時間が長くなるに連れてオリゴペプチドが伸長して行くのは反応生成物がリアクター内を循環して繰り返し高温高压部に入るからです。そこで重合反応のための熱エネルギーを受けとり、低温部に噴出されることによって消費者支配の熱力学からの作用を受けて重合物が定着され、それにより逐次ペプチド結合を伸長させて行くことが出来るようになります。

反応生成物がリアクター内を循環する時間はリアクターの配管長を変えることによって任意に設定できます。ところが、実際の海底熱水口では一度熱水口から

噴出された反応生成物が再び同じ熱水口か近傍の熱水口に舞い戻ってくる時間は地質条件に一方的に依存し、実験室内で設定するよりはるかに大きくなります。同じ長さのオリゴペプチドを得るのに実際の海底熱水口の方が実験室でのフローリアクターに比べてはるかに長い時間を要することになりますが、温度緩和速度の最大化という消費者支配の熱力学の作用の仕方は同一、不変です。海底熱水口を巡る化学進化に要する時間は反応分子に固有なのではありません。この時間を決めるのはあくまでも海底熱水口を特徴づける地質状況です。

更に、温度緩和速度の最大化という消費者支配の熱力学の枠内で熱エネルギーを分子結合エネルギーに変換させるのはアミノ酸からのペプチド結合生成に限られはしません。核酸単量体が相互にリン酸ジエステル結合を通して重合し、オリゴヌクレオチドを生成する過程、それに加えて、蟻酸、酢酸などの単純な酸を重合させ、長鎖の脂肪酸、脂質を生成する過程も同様の海底熱水口の近くで出現すると想定されます¹⁸⁻²⁰⁾。

5 温度緩和がもたらすダーウィン進化

海底熱水口の近くでは周りの冷海水を熱エネルギー消費者とすることにより、消費者支配の熱力学がそこで作動し、その結果として熱エネルギーを分子結合エネルギーに変換させることを行います。熱エネルギーを分子結合エネルギーに変換させたその典型例はオリゴペプチドです。このオリゴペプチドは熱力学的には安定な状態にはありません。高々、準安定な状態にあるだけです。準安定な状態とは更に解放されるべきエネルギーを内蔵していることを指します。準安定な分子重合体はそれをエネルギー供給体と見なす新たなエネルギー消費者の出現をうながします。準安定な分子重合体はそれ自体で孤立したエネルギー供給者であって、新たな消費者支配の熱力学が出現し得る舞台を準備します。原始地球上の海洋では初代のエネルギー消費者は海底熱水口の周りの冷海水であったのですが、準安定な分子重合体が蓄積されて行くにつれ、新たな次世代のエネルギー消費者の出現をうながします。ここで定着されることになる次世代のエネルギー消費者は蓄積されてきた準安定なエネルギー源を最も速く消費するものになる筈です。準安定な分子重合体の実効温度を最も速く降下させるものがここに定着されます。消費者支配の熱力学に固有な温度降下速度最大化がそこで進行することになります。

初代のエネルギー消費者に続く次世代のエネルギー消費者がどのような分子ハードウェアを伴っているかはもちろん未だ明らかにされてはいませんが、その次世代のエネルギー消費者が伴うことになるソフトウェアについては一部が既に判明となっています。次世代のエネルギー消費者の生成が続く限り、最も確からしいエネルギー消費者は蓄積されてきた準安定な分子重合体からのエネルギーを最も速く消費するものとなります。これは生物進化で受け入れられてきたダーウィン進化を化学進化に翻訳したものに他なりません。むしろ翻って、ダーウィン進化の原形が既に化学進化のうちに現われていることを指します。生物において現われる生物個体はそれぞれがエネルギー消費者です。しかも、エネルギー消費者の出現、存続は消費者支配の熱力学で生ずる現象です。この限りにおいて、ダー

ウィン進化は消費者支配の熱力学に従う物理過程を通して自ずと出現してくるようになります²¹⁾。

ダーウィン進化は、紛れもなく独特な物質過程ですが、これまでに確立された物理学での物質過程には含まれず、生物に固有な過程として理解されて来た歴史的経緯があります。しかし、これは物理学をあまりにも窮屈に捉えた結果でしかありません。ここにおいて注目されるべきは、温度と温度緩和、というありふれた物性です。温度緩和を認めると、熱エネルギーの供給者に加えて、その消費者も自明のこととして受け入れられるようになります。熱エネルギーの消費者に由来する温度緩和が生じるとき、それが単なるエネルギー分布の緩和に帰着するのは限られた場合でしかありません。外部からエネルギーが供給され、対象としている物体がエネルギー励起を受け、その温度が上昇するならば、その緩和は可能な限りの最大速度で進行することになります。特に、その励起エネルギーの一部をその物体内に閉じ込めた場合、温度緩和をより速く進行させることができます。この極端な例は、超新星爆発による鉄原子核を含むの原子核の生成です。爆発によって宇宙空間に撒き散らされた原子核は周りの冷熱源からの影響を受けて急速に冷却されることになりますが、原子核が以前の核子に分解してしまうよりも、原子核のままの方がより速くその温度を降下させることが出来るならば、かつての熱エネルギーは原子核に閉じ込められたままになります。

物質は外部から供給されたエネルギーをそのまま内部に閉じ込めるようにすべくその内包を変化させることが出来ます。それを実現させるのが温度緩和です。物質に由来するダーウィン進化は、まさに、物質がその外から供給されたエネルギーを一時その内部にとどめ置くよう、その内包を変えることが出来ることを明示しています。温度と温度緩和という物性がダーウィン進化の出現を予見すると同時に、それに物理過程としての確固たる基盤を与えることになります。温度という強度をもたらす熱力学によって量子力学過程が制約を受けることに留意するならば、物理から生物への移行は連続であり、陸続きとなります。

[文献]

1. Matsuno, K., *Protobiology: Physical Basis of Biology*, CRC Press (1989)
2. Matsuno, K., Swenson, R., Thermodynamics in the present progressive mode and its role in the context of the origin of life. *BioSystems* 51, 53-61 (1999).
3. Matsuno, K., Biodynamics for the emergence of energy consumers, *BioSystems* 42, 119-127 (1997).
4. Matsuno, K., Cell motility as an entangled quantum coherence. *BioSystems* 51, 15-19 (1999).
5. Brack, A. (Ed.), *The Molecular Origins of Life: Assembling Pieces of the Puzzle*, Cambridge University Press (1998).
6. Chiar, J. E., The nature and evolution of interstellar ices. *Origins Life Evol. Biosphere* 27, 79-100 (1997).

7. Pendleton, Y. J., Detection of organic matter in interstellar grains. *Origins Life Evol. Biosphere* 27, 53-78 (1997).
8. Greenberg, J. M., Li, A., Mendoza-Gomez, C. X., Schutte, W. A., and Gerakines, P. A., Approaching the interstellar grain organic refractory component. *Astrophys. J.* 455, L177-180 (1995).
9. Greenberg, J. M., and Krueger, F. R., From the formation of bioorganics in interstellar dust to the thermodynamics of self-organization in cometary grains as seeds of life's origins: Are 10^{25} chances enough? *Origins Life Evol. Biosphere* 26, 208-209 (1996).
10. Corliss, J. B., *et al.*, Submarine thermal springs on the Galapagos rift. *Science* 203, 1073-1083 (1979)
11. Edmond, J. M., *et al.*, Chemistry of hot springs on the East Pacific rise and their effluent dispersal. *Nature* 297, 187-191 (1982).
12. Toyozawa, Y., Multistep photosynthesis of metastable compounds – the origin of life on the earth. *J. Phys. Soc. Jpn* 66, 3737-3740 (1997).
13. Matsuno, K., Boltzmann's dynamics on the primitive earth about 3.8 billion years ago. In: *Chemical Evolution: Physics of the Origin and Evolution of Life* (Chela-Flores, J. & Raulin, F. (Eds.)) Kluwer (1996), pp. 231-238.
14. Matsuno, K., A design principle of a flow reactor simulating prebiotic evolution. *Viva Origino* 25, 191-204 (1997).
15. Imai, E., *et al.*, Autocatalytic synthesis of oligoglycine in a simulated submarine hydrothermal system. *Origin Life Evol. Biosphere* 29, 249-259 (1999).
16. Russell, M. J., and Hall, A. J., 1997. The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front. *J. Geol. Soc. London* 154, 377-402.
17. Imai, E., *et al.*, Elongation of oligopeptides in a simulated submarine hydrothermal system. *Science* 283, 831-833 (1999).
18. Ferris, J. P., Chemical markers of prebiotic chemistry in hydrothermal systems. *Origins Life Evol. Biosphere* 22, 109-134 (1992).
19. McCollom, T. M., *et al.*, Lipid synthesis under hydrothermal conditions by Fischer-Tropsch-type reactions. *Origins Life Evol. Biosphere* 29, 153-166 (1999).
20. Terada, R., *et al.*, Fixation of carbon dioxide in hydrothermal environments: synthesis of formic and acetic acids. *Viva Origino* 27, 197-208 (1999).
21. Matsuno, K., Consumer power as the major evolutionary force. *J. Theor. Biol.* 173, 137-145 (1995).